

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ В КАНАЛЕ ОДНОШНЕКОВОГО ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРА

**Тимофеева Д. В., Коротков В.Г., Попов В.П., Антимонов С.В.,
Соловых С.Ю.**

ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург

В настоящее время достаточно широко развито производство с использованием экструзионных технологий в различных отраслях промышленности: полимерной, пищевой промышленности, а так же для брикетирования опилок. Экструдирование применяется с целью получения разнообразных продуктов. Так например: вспученных экструдатов, полуфабрикатов вспученных экструдатов, макаронных изделий, пиллет т.д. Имеется достаточно большое количество исследований, направленных на изучение процессов экструзионной обработки материалов. Однако практически все эти исследования направлены на изучение интенсификации процессов движения, смешивания, разогревания и т.д. в экструдере уже спрессованных материалов или же процессов формования экструдированных материалов в матрице экструдера. Не производилось исследований процесса превращения сыпучего продукта, загружаемого в экструдер, в спрессованный однородный материал. Математической модели данного процесса в настоящее время не создано. Интенсификации данного процесса практически не проводилось [1,2].

На сегодняшний день при экструдировании продуктов имеются проблемы, связанные со значительными сырьевыми и энергетическими затратами [3]. Актуальной проблемой является изучение и реализация возможности снижения энергозатрат за счет оптимизации адгезионно-когезионных взаимодействий в процессе превращения сыпучего материала в спрессованный. В связи с вышесказанным, является целесообразным изучение процесса преобразования сыпучего материала, подаваемого в экструдер в упруго-вязко-пластичную массу и разработка конструкции оборудования для более интенсивного осуществления данного процесса.

Тема энергосбережения, как следствие, тема использования вторичного сырья, и, в частности производство топливных брикетов, очень актуальна сейчас. Это и понятно. Отходов от переработки леса много. Более рационально, когда опилки перерабатываются. Спрос на топливные брикеты из опилок в странах Европы постоянно высокий и нет предпосылок к насыщению.

В животноводческих хозяйствах так же имеется дефицит комбикормов. Вышеприведенные продукты и корма с успехом могут производиться с использованием экструзионных технологий. Однако, применяемые в настоящее время экструзионные технологии подразумевают значительные энерго- и ресурсовложения. Мелкие животноводческие хозяйства заинтересованы в создании собственных мини-комбикормовых, мини-экструзионных и т.д. производств [4]. Вместе с тем, данное производство не должно быть энерго и

ресурсоемким. Машиностроительные предприятия России заинтересованы в производстве энергоресурсосберегающих мини-линий для производства кормов, кормовых добавок и вспученных экструдатов, пилет, которые, несомненно, будут востребованы потребителями, а так же мелкими и средними животноводческими хозяйствами.

Ведущими представителями, производящими технологии и оборудование для экструзионного воздействия на перерабатываемый материал являются: немецкая фирма «Бюллер», итальянская фирма «Паван-мамримпьянти», французская фирма «Бассано». Вышеперечисленные фирмы разработали достаточно эффективные методы осуществления экструзионных технологий. Однако, несмотря на наличие при фирмах научно-исследовательских центров, технологии, разработанные ими, осуществляются без выхода на оптимальные режимы, не учитывают кинетику изменения структурно-механических свойств и химического состава, а также не учитывают адгезионно-когезионного взаимодействия [5]. Внедрение разрабатываемой авторами конструкции экструзионного оборудования позволит обеспечить стабильное существование машиностроительных предприятий и улучшить работу небольших фермерских хозяйств. Аналогов предлагаемой конструкции в данное время не имеется не в России не за рубежом.

Целью исследования являлось изучение влияния параметров процесса и конструкции экструдера на изменение агрегатного состояния сырья в процессе его переработки.

Задачи исследования:

- анализ существующего оборудования, выявление недостатков и особенностей узлов уплотнения перерабатываемых материалов;
- разработка конструкции лабораторной установки для изучения адгезионно-когезионных свойств исследуемых материалов;
- изучение эффективности работы типового одношнекового экструдера с точки зрения изменения плотности перерабатываемого сырья, при его продвижении вдоль шнека экструдера;
- оптимизация процесса производства макаронных изделий с целью повышения их прочности, за счет изменения технологических параметров процесса и кинематических параметров экструдера.

Был проведен анализ существующих математических моделей, используемых при экструдировании. [6-8]. При смешивании используются модели уравнения баланса мощностей с учетом гидравлических коэффициентов смеси, а для прессования используются реологические модели, основанные на реологических критериях. Из чего можно сделать вывод, что нет единого описания для экструдирования, и отсутствует математическая модель описания преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичное тело.

В работе была использована лабораторная экструзионная установка, разработанная на факультете пищевой биотехнологии и инженерии.

Разработана конструкция шнекового экструдера, который отличается тем, что витки в зоне загрузки и транспортирования выполнены с возможностью осевого перемещения посредством вращения резьбового вала приводного

механизма, расположенного в теле шнека, на котором расположены втулки с установленными пальцами, соединенными с витками шнека и совершающими движение по направляющим, выполненным так же в теле шнека.

Конструкция шнековой камеры экструдера была разбита на пять зон (рисунок 1): зона загрузки, зона транспортирования, зона сжатия, зона гомогенизации и зона формования. Изучено преобразование материала в каждой зоне с точки зрения его плотности и, как следствие, прочности.

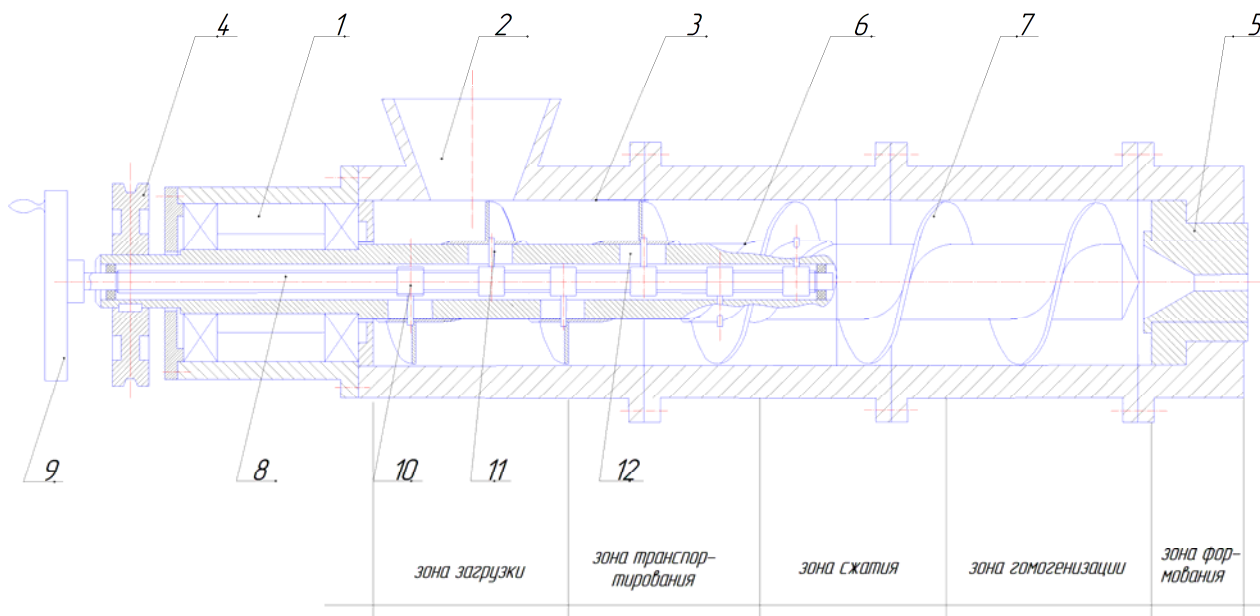


Рисунок 1 – Рабочий узел шнековой камеры пресс-экструдера.

Результаты исследований для типового одношнекового экструдера представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Плотность материала в зонах шнековой камеры экструдера.

Зоны шнековой камеры	Зона загрузки	Зона транспортирования	Зона сжатия	Зона гомогенизации	Зона формования
Плотность, г/см ³	750	760	1100	1200	1300

Результаты свидетельствуют о недостаточном уплотнении материала в зоне сжатия 1100 г/см³, по сравнению с 1300 г/см³, которые получаем на выходе из экструдера. А также о недостаточной плотности материала на выходе из экструдера 1300 г/см³, по сравнению с 1400 г/см³, достигаемых на гидравлических прессах, при использовании аналогичного сырья. Вышеприведенные данные, вероятно, объясняются неэффективной работой шнековой камеры пресс-экструдера в зоне сжатия, при использовании традиционной конструкции шнековой камеры.

Так же были проведены исследования экструдирования сосновых опилок, пшеничных отрубей в чистом виде и в составе бинарной смеси (пшеничные отруби+сосновые опилки, начальная влажность смеси $W_0 = 5,5\%$). Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты экструдирования сосновых опилок, пшеничных отрубей в чистом виде и в составе бинарной смеси (пшеничные отруби + сосновые опилки, начальная влажность смеси $W_0 = 5,5\%$)

Продукт	$t_{прод.в}$, °C	J, А	P, кВт	W, кВт час/кг	Q, кг/ч
Отруби пшеничные – 50% Опилки сосновые– 50% Влажность смеси H ₂ O – 40%	44-19	7,8-10	3,79-4,86	0,132-0,169	28,8
Отруби пшеничные – 50% Опилки сосновые– 50% Влажность смеси H ₂ O – 25%	-	7,8-8,5	3,79-4,14	0,132-0,144	28,8
Отруби пшеничные – 50% Опилки сосновые – 50% 5% Na ₂ CO ₃ Влажность смеси– 60%	35	7,0	3,41	0,067	51,05
Отруби пшеничные – 50% Опилки сосновые– 50% 5% Na ₂ CO ₃ Влажность смеси – 50%	51	8-8,5	3,89-4,14	0,110-0,117	35,28

Начальная влажность: опилки сосны - 6,3-6,4%; отруби пшеничные - 4,5%; смесь – 5,5%.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что минимальная энергоёмкость и максимальная производительность наблюдаются при составе бинарной смеси отруби пшеничные – 50%, опилки сосновые – 50%, 5% Na₂CO₃, влажность смеси– 60%.

В работе были использованы разработанные ранее математические методы оптимизации биотехнологических объектов на основе математического планирования экспериментов, которые были апробированы при определении удельной прочности получаемых экструдатов. При этом в соответствии с планом эксперимента было проведено экструдирование пшеничной муки с получением макаронных изделий типа лапши и определялась удельная прочность на разрез на приборе ПМ2. После серии экспериментов был

разработан план полного факторного эксперимента ПФЭ³, с включением ключевых точек с целью получения уравнений второго порядка. Значения исследованных факторов в плане представлены в условных единицах. Ключевые точки плана эксперимента в условных единицах и натуральных значениях представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения исследованных факторов.

Массовая доля влаги в экструзионной смеси			
Условные единицы, X ₁	-1	0	1
Натуральные значения, W %	28	31	34
Частота вращения шнека экструдера			
Условные единицы, X ₂	-1	0	1
Натуральные значения, ω об/мин	40	70	100
Температура обработки материала			
Условные единицы, X ₃	-1	0	1
Натуральные значения, t °С	20	50	80

План эксперимента ПФЭ³ в условных единицах представлен в таблице 3.

Для обеспечения требуемой точности все опыты проводились в трех повторностях. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты эксперимента

№ опыта	Удельная прочность г/мм ²		
	повторность		
	№ 1	№ 2	№ 3
1	9	10	8
2	10	11	9
3	11	12	10
4	10,5	10	11
5	9,001	10,001	8,001
6	10,001	11,001	9,001
7	11,001	12,001	10,001
8	10,501	10,001	11,001
9	9,5	9	10
№ опыта	Удельная прочность г/мм ²		
	повторность		
	№ 1	№ 2	№ 3
10	10,75	10,5	11
11	10	9	11

12	10,25	10	10,5
13	13	13,5	12,5
14	13,1	13,5	12,5
15	12,9	13,5	12,5

По результатам эксперимента было получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость удельной прочности от массовой доли влаги в экструзионной смеси, частоты вращения шнека экструдера и температуры обработки материала:

$$Y_n = 10,70027 + 0,595186 \cdot x_1 - 0,375 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,443704986 \cdot x_1^2 - 1,443704986 \cdot x_2^2 + 0,513807551 \cdot x_3^2,$$

(1)

где x_1, x_2, x_3 - соответственно массовая доля влаги, частота вращения шнека экструдера и температура обработки материала представлены в условных единицах.

Для подстановки исходных факторов в натуральных значениях в вышеприведенное уравнение могут быть использованы зависимости:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,3333 \cdot W - 10,3333, \\ x_2 &= 0,0333 \cdot \omega - 2,3333, \\ x_3 &= 0,0333 \cdot t - 1,6667. \end{aligned} \quad (2)$$

где W - массовая доля влаги в экструзионной смеси, %;
 ω - частота вращения шнека экструдера, об/мин;
 t - температура обработки материала, $^{\circ}\text{C}$.

По уравнению регрессии были построены плоскости отклика для температуры обработки материала 20°C , 50°C и 80°C . Плоскость отклика для $t = 20^{\circ}\text{C}$ представлена на рисунке 2.

Анализ плоскостей отклика позволяет сделать вывод о том, что с целью достижения наибольшей удельной прочности (а как следствие наилучшего качества макарон) необходимо использовать массовую долю влаги от 0 до 0,5 условных единиц (31-32,5 %), частоту вращения шнека экструдера от -0,4 до 0,4 условных единиц (58-82 об/мин) и температуру обработки материала 20°C .

Проведены исследования процесса экструдирования различных видов сырья (пшеничная мука, рис, рисовая сечка, гречневая крупа, продел гречки и подсолнечника, опилок) на изменение физико-химических и структурно-механических свойств перерабатываемых материалов. Особое внимание при этом уделялось изучению явления когезии и адгезии.

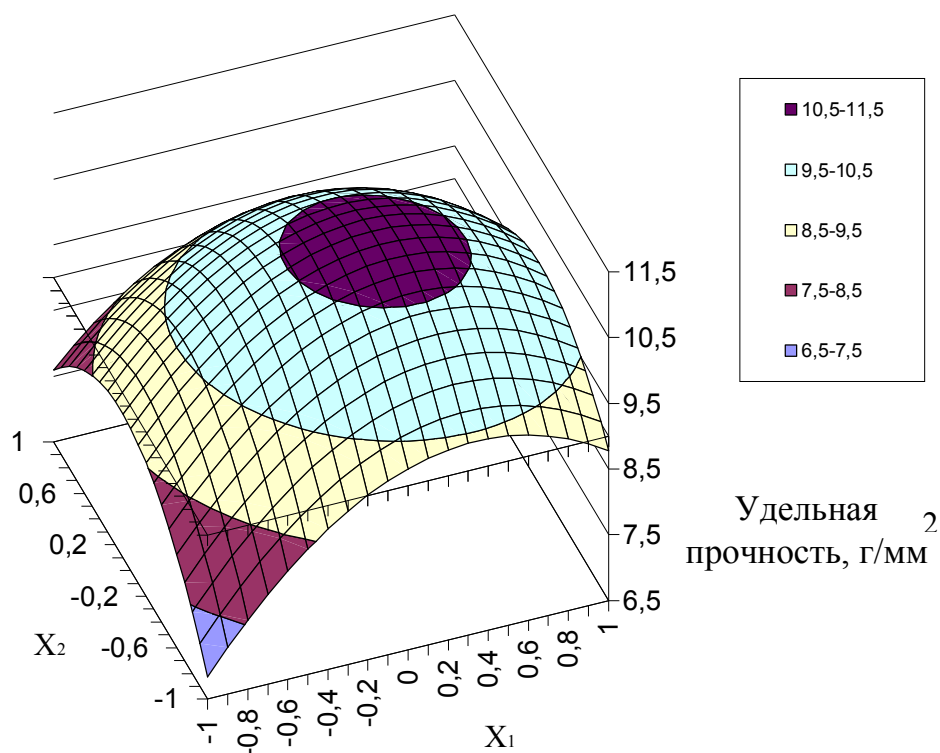


Рисунок 2 – Влияние массовой доли влаги в экструзионной смеси (x_1) и частоты вращения шнека экструдера (x_2) при относительной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (x_3) на удельную прочность г/мм².

По результатам исследования:

- изготовлена лабораторная установка со сменным узлом уплотнения;
- изготовлена лабораторная установка для изучения агрегатного состояния перерабатываемого сырья с точки зрения его когезионно-адгезионных свойств;
- изучено изменение плотности материала в зонах шнековой камеры типового одношнекового экструдера (зона загрузки, зона транспортирования, зона сжатия, зона гомогенизации и зона формования). Результаты свидетельствуют о недостаточном уплотнении материала в зоне сжатия 1100 г/см^3 , по сравнению с 1300 г/см^3 , которые получаем на выходе из экструдера. А также о недостаточной плотности материала на выходе из экструдера 1300 г/см^3 , по сравнению с 1400 г/см^3 , достигаемых на гидравлических прессах, при использовании аналогичного сырья. Вышеприведенные данные, вероятно, объясняются неэффективной работой шнековой камеры пресс-экструдера в зоне сжатия, при использовании традиционной конструкции шнековой камеры;
- проведена оптимизация технологических параметров процесса и кинематических параметров экструдера с целью повышения прочности макаронных изделий. Выявлено, что наибольшую прочность имеют изделия, с массовой долей влаги от 0 до 0,5 условных единиц (31-32,5 %), частотой вращения шнека экструдера от -0,4 до 0,4 условных единиц (58-82 об/мин) и температурой обработки материала $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

1. **Выгодин В.А.** Экструзионная техника и технология: состояние, перспективы / В.А. Выгодин, В.Л. Касперович, Г.Б. Зинюхин, В.П. Попов, В.А. Буцко // *Пищевая промышленность*. 1995. № 7. С. 4.
2. **Абрамов О.В.** Исследование основных закономерностей процесса экструзии при производстве комбинированных продуктов питания / О. В. Абрамов // *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2007. - № 6. - С. 69-72. - Библиогр.: с. 72 (3 назв.).
3. **Остриков А.Н.** Экструзия в пищевой технологии / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин. - СПб. : ГИОРД, 2004. - 288 с. : ил. - Библиогр.: с. 263-281 - ISBN 5-901065-62-X.
4. **Коротков В.Г.** Исследование и обоснование рабочего процесса кормоприготовительного агрегата для нужд малых и средних фермерских хозяйств / В.Г. Коротков, Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых // депонированная рукопись № 608-В2004 13.04.2004
5. **Антимонов С.В.** Пшеничные отруби в технологии получения экструдированных экологически чистых кормов из отходов крупяных предприятий / С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых, Е.В. Ганин // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2008. № 4. С. 8-10.
6. **Коротков В.Г.** Оценка процесса смешения экструдированного продукта в канале шнека / В.Г. Коротков, Т.М. Зубкова, Д.А. Мусиенко // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2000. № 3. С. 104-106.
7. **Попов В.П.** [Способ ввода водных суспензий в корма и экструдер для его осуществления](#) / В.П. Попов, С.П. Василевская, В.П. Ханин, В.Ю. Полищук // патент на изобретение RUS 2266677 25.07.2003
8. **Бондаренко В.А.** Способ экструзии зернового крахмалосодержащего сырья / В.А. Бондаренко, В.Л. Касперович, В.П. Попов // патент на изобретение RUS 2147814 24.11.1998